

El control continuo y el "tracking"

Capítulo 9: Control

Wickens, Gordon y Liu, 1998. pp. 274-283.

(...)

Mucho de nuestro trabajo y vida diarios se caracteriza por hacer que el resultado de un "cursor" o algún sistema correspondiente (por ej., un vehículo) siga a un objeto dinámico en continuo movimiento. Esto puede implicar tareas tan mundanas como guiar una bicicleta por una curva o tan complejas como pilotar un avión a través de una trayectoria curva en el cielo, guiar nuestro punto de vista a través de un "entorno virtual" o elevar la temperatura de un reactor nuclear hasta un valor deseado mediante una trayectoria cuidadosamente controlada. Estos casos y muchos otros son descritos por la tarea genérica de "tracking" (Poulton, 1974; Wickens, 1986), es decir, la tarea de hacer que el resultado (output) de un sistema se corresponda en el tiempo y el espacio con un input (o información de entrada) elegido, que varía con el tiempo.

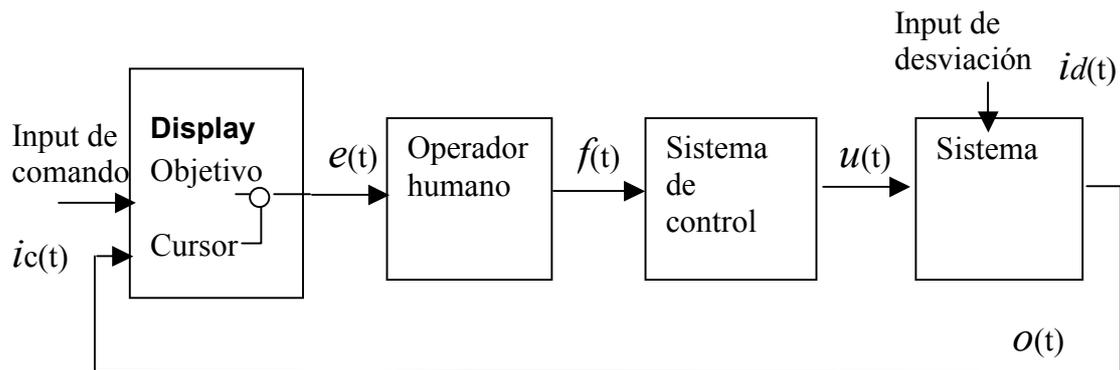


Figura 9.6: El bucle de control (tracking) de círculo cerrado

$i_c(t)$ = input de comando

$e(t)$ = función de error en el tiempo

$f(t)$ = fuerza aplicada sobre el dispositivo de control (volante)

$u(t)$ = cambio producido en el dispositivo de control

$o(t)$ = el output del sistema

$i_d(t)$ = inputs de perturbación

La Figura 9.6 presenta los **elementos básicos** de una tarea de tracking. Cada elemento recibe un input variable en el tiempo y produce un correspondiente output también variable en el tiempo. Estos elementos pueden ser descritos en el contexto de la conducción de automóviles (Cap. 17), aunque es importante pensar en cómo pueden generalizarse a cualquier número de diferentes tareas de tracking.

Cuando conduce un automóvil, el operador humano percibe una discrepancia o error entre el estado deseado del vehículo y su estado actual. El coche puede haberse desviado del centro del carril o puede estar dirigiéndose hacia un punto fuera de la carretera. El conductor quiere reducir esta función de error en el tiempo $e(t)$. Para ello aplica una fuerza, $f(t)$ al volante o dispositivo de control. Esta fuerza produce a cambio una rotación, $u(t)$, del mismo volante, una rotación que llamamos output de control¹.

La relación entre la fuerza aplicada y el output del elemento de control (volante) se define como la dinámica de control, y esta dinámica es la responsable del feedback propioceptivo que recibe el operador.

El movimiento del volante o dispositivo de control de acuerdo con una determinada función de tiempo, $u(t)$, provoca entonces que la posición actual del vehículo se mueva lateralmente en la carretera. Nos referimos a este movimiento como el output del sistema, $o(t)$. Como ya destacamos en este Capítulo, cuando se presenta en un display, la representación de la posición del output se llama cursor. La relación entre el control de output, $u(t)$ y la respuesta del sistema, $o(t)$, es definida como la dinámica del sistema.

Al discutir la forma del posicionamiento de los instrumentos de control, vimos la diferencia entre la posición y la dinámica de la velocidad del sistema. Si el conductor tiene éxito en la corrección aplicada al volante, entonces la discrepancia entre la posición del vehículo en la carretera, $o(t)$, y la posición deseada o "comandada" en el centro del carril, $i_c(t)$ se reducirá. Es decir, el error, $e(t)$, será reducido a cero. En un display, el símbolo que representa el input se llama "objetivo" (*'target'*). La diferencia entre las señales de output e input es el error, $e(t)$, el punto de inicio de nuestra discusión. El buen conductor responderá de forma que mantenga el output, $o(t) = \text{input}$, $i(t)$; o bien el error, $e(t) = 0$. El sistema representado en la Figura 9.6 se llama sistema de control de feedback de círculo cerrado (Powers, 1973).

Dado que los errores en el seguimiento (tracking) estimulan la necesidad de efectuar respuestas correctoras, el operador no necesita responder en absoluto mientras no existe error. Esto puede suceder cuando se conduce por una carretera recta y vacía en un día sin viento. Sin embargo, los errores surgen comúnmente de dos fuentes distintas: los inputs de comando, $i_c(t)$, que son cambios en el target que debe ser perseguido ('tracked'). Por ejemplo, si la carretera presenta a continuación una curva, ello generará un error para un vehículo que viaja en línea recta y por tanto requerirá una repuesta correctora.

¹ (Nótese que nuestro marco de referencia aquí es el humano. Por tanto usamos el término output desde el humano, más que como input del sistema).

Los inputs de perturbación, $i_d(t)$, son aquellos que se aplican directamente al sistema y que el operador debe compensar. Por ejemplo, un golpe de viento que empuja al coche fuera del centro del carril es un input de perturbación. También lo es un movimiento accidental del volante realizado por el conductor.

La fuente de toda información necesaria para implementar la respuesta correctora es el display (ver Cap. 7). Para el conductor de un automóvil, el display es simplemente el campo de visión contemplado a través del parabrisas, pero por ejemplo, para el piloto de un avión que realiza un aterrizaje instrumental, el display es representado por los instrumentos que representan el cabeceo ('pitch'), alabeo ('roll'), altitud y la información sobre la trayectoria. Debe hacerse una importante distinción entre los displays de tracking de persecución y compensatorios (Fig. 9.7 a; el automóvil como display de persecución).

Un display de persecución presenta sólo el movimiento del error relativo a una referencia fija en el display. El display no proporciona indicación de si este error surge de un cambio en el output del sistema o en el input de comando (Roscoe, Corl y Jensen, 1981). En cambio, los instrumentos de navegación en vuelo son, comúnmente, displays compensatorios (Fig. 9.7 b).

Tal como destacábamos en el Cap. 8, los displays pueden contener información predictiva acerca del estado futuro del sistema, una característica valiosa si la dinámica del sistema es lenta. El display del automóvil es del tipo predictor porque la dirección actual de la trayectoria, relativa al punto de desvanecimiento de la carretera proporciona información de la desviación lateral futura.

Finalmente, la ejecución del tracking se mide comúnmente en términos de error. Éste se calcula en cada momento del tiempo como desviación absoluta y entonces se acumula y se promedia (se divide por el número de puntos o momentos de muestreo) a lo largo de la duración del ensayo de tracking. Kelley discutió diferentes métodos de calcular la ejecución del tracking.

Ahora que hemos visto los elementos de la tarea de tracking que caracterizan los esfuerzos del humano por hacer que el output del sistema igualen el input de comando elegido, podemos preguntarnos qué características de la interacción humano-sistema provocan dificultad en la tarea (aumento del error o carga mental incrementada). Con este conocimiento en mente, es posible para el diseñador intervenir para mejorar los sistemas de tracking. Como veremos, algunos de estos problemas residen en el sistema mismo de tracking, otros sobre las limitaciones de procesamiento del operador humano y aun otras implican la interacción de ambos.

El input

Dibujar una línea recta en un papel o conducir un coche por una carretera recta en un día sin viento son ambos ejemplos de tareas de tracking. Existe un input elegido de comando y un output del sistema (la punta del lápiz o la posición del vehículo). Pero el input no varía; por tanto, la tarea resulta sencilla. Después de que se ha alcanzado la trayectoria prevista no hay nada que hacer excepto moverse hacia adelante, y puedes

conducir deprisa (o dibujar deprisa) casi tan fácilmente como conducir (o dibujar) más despacio. Sin embargo, si la línea objetivo sigue una trayectoria ondulante o la carretera es virada, existen correcciones que deben hacerse y cierta incertidumbre en el proceso, y como resultado, pueden incrementar tanto el error como la carga mental si uno trata de moverse más deprisa. Esto sucede porque la frecuencia de las correcciones que hay que realizar aumenta con un movimiento más rápido y la habilidad humana para generar una serie de respuestas rápidas a estímulos inciertos o impredecibles (desviaciones en la línea o la carretera) es limitada. Por tanto, al conducir demasiado deprisa en una carretera virada comenzaremos a desviarnos más del centro del carril y nuestra carga mental será más alta si intentamos mantenernos en el centro.

Nos referimos a las propiedades del input que determinan la frecuencia con la que deben realizarse las correcciones como el "ancho de banda" del input. Mientras la frecuencia de desviaciones de un input de comando es una de las fuentes de 'ancho de banda', también lo será la frecuencia de perturbaciones de un input de perturbación como golpes de viento (o por ej., dibujar una línea recta sobre un papel a bordo de un coche que se mueve).

En las tareas de tracking expresamos comúnmente el ancho de banda en términos de ciclos por segundo (Hz) del input con frecuencia más alta, tanto en el input de comando como en el de perturbación. Resulta muy difícil para las personas realizar tareas de tracking con un input de aparición aleatoria que tenga un ancho de banda superior a 1 Hz. Los inputs con un elevado ancho de banda mantienen a un operador muy ocupado con el sampling visual y el control motor, pero no implican mucha complejidad cognitiva. A esta última contribuye en cambio el orden de un sistema de control, a lo cual nos dedicaremos a continuación.

Orden de control

Control de la posición

Hemos presentado el concepto de orden de control en nuestra discusión del posicionamiento de los controles, cuando se contrastaban los sistemas de control de la posición y la velocidad (por ejemplo, el ratón y el joystick, respectivamente). Así, el orden de un sistema de control se refiere a si un cambio en la posición de un instrumento de control (por parte del operador humano) lleva a un cambio en la posición (orden-cero), la velocidad (primer-orden) o la aceleración (segundo-orden) del output del sistema.

Consideremos el movimiento de un lápiz sobre el papel o de un puntero sobre la pizarra, el movimiento de búsqueda del sintonizador de una vieja radio analógica para buscar una emisora o mover el ratón de un ordenador para situar el cursor en la pantalla. En cada uno de estos casos, una nueva posición del instrumento de control lleva a una nueva posición del output del sistema. Si se mantiene parado el (instrumento de) control, el output del sistema también se mantendrá parado. Esto es control de orden-cero (ver Figura 9.8 a).

Insertar aquí Figura 9.8

Control de la velocidad

Ahora consideremos el escaner de una típica radio digital de coche. Apretar el botón de búsqueda (llevarlo a una nueva posición) crea un índice constante de cambio o velocidad de ajuste (búsqueda) de una frecuencia². Esto es el control de primer-orden. Como destacamos anteriormente en el Capítulo, la mayoría de los joysticks utilizan el control de velocidad. Una relación análoga de control de 1^{er} orden se da entre la posición del volante (input) y el índice de cambio (velocidad) en la dirección del vehículo (output). Como se muestra en la Figura 9.8 b, un nuevo ángulo del volante (posición) conlleva aproximadamente un índice constante de cambio de la trayectoria. Un ángulo mayor del volante lleva a un giro más cerrado (un grado mayor de cambio en la dirección).

En términos de cálculo integral, el orden de control se corresponde con el número de integrales de tiempo entre el input y el output; esto es, para el control de 1^{er} orden:

$$o(t) = \int i(t) dt$$

Tanto O (la posición) como los controles de 1^{er} orden (velocidad) son importantes a la hora de diseñar instrumentos de control manual. Cada uno tiene sus costes y sus beneficios. Hasta cierto punto, la cuestión de "cuál es el mejor" tiene una respuesta de "depende". En parte, esta elección depende de los objetivos. Si por una parte, la exactitud en el posicionamiento es muy importante (como situar un cursor en un punto de la pantalla), entonces el control de la posición tiene sus ventajas, como vimos en la Figura 9.3.

Por otro lado, si la finalidad es seguir un objeto móvil o desplazarse (moverse hacia adelante) en una trayectoria o pista (es decir, igualar una velocidad), entonces se pueden comprobar las ventajas del control de velocidad de 1^{er} orden. Una importante diferencia es que el control de orden-cero requiere a menudo mucho esfuerzo físico para ejecutar acciones repetidas. El control de la velocidad puede ser más económico en esfuerzo porque sólo hay que ajustar el sistema a una velocidad apropiada en la dirección correcta y dejar que el output del sistema alcance el objetivo deseado.

Cualquier instrumento de control que utiliza la dinámica de 1^{er} orden debe tener un punto neutral claramente definido y fácilmente alcanzable, en el que no se imprime

² En algunos controles, apretar el botón más fuertemente o durante más tiempo llevará a una velocidad de búsqueda proporcionalmente mayor (y entonces se trataría de una excepción a lo que estamos diciendo).

ninguna velocidad al 'cursor'. Esto es así porque la parada es un estado por defecto muy frecuente. Esta es la ventaja de los joysticks de carga general ("*spring-loaded*") para el control de la velocidad, dado que el punto de descanso neutral se establece para proporcionar velocidad cero. Ello representa un problema cuando el ratón está configurado como un sistema de control de primer orden, ya que no existe un punto cero (neutral) natural en la alfombrilla del ratón.

Aunque los sistemas de 1^{er} orden se caracterizan por mantener el esfuerzo, como se muestra en la Figura 9.8 b, estos sistemas de 1^{er} orden tienden a tener un mayor retraso de tiempo entre el momento en que el humano proporciona un output al control (aplica una fuerza) y el momento en que el sistema alcanza su posición deseada.

Control de aceleración

Consideremos el caso de un astronauta que debe maniobrar una nave espacial hacia una posición precisa encendiendo los cohetes propulsores. Dada la inercia del vehículo, cada impulso del cohete produce una aceleración de la nave mientras el cohete esté funcionando. El curso de tiempo de este sistema ofrece un aspecto similar al mostrado en la Figura 9.8 c.

Se trata, en general, de un sistema de control de aceleración de 2^o orden, descrito en la ecuación:

$$O(t) = \int i(t) dt$$

Para obtener una "impresión" intuitiva del control de 2^o orden, trate de hacer rodar una lata (o una bola) a una nueva posición sobre una bandeja (Figura 9.8 d). Los sistemas de 2^o orden son generalmente difíciles de controlar porque son tanto inestables como lentos (o de respuesta lenta). La lentitud puede verse en el mayor retraso representado en la Figura 9.8 c. Como veremos, ambas propiedades requieren que el operador anticipe y prediga (control basado en el futuro, no en el presente), y como aprendimos en el Cap. 8, esta es una fuente de carga de trabajo cognitivamente demandante para el operador humano.

Dado que los sistemas de 2^o orden son difíciles de controlar, raramente (si acaso se hace) son diseñados dentro de otros sistemas. Sin embargo, muchos sistemas que debe controlar los humanos tienen una respuesta de aceleración lenta a un input de posición, dada la masa e inercia de los elementos controlados en el mundo físico. Como ya vimos, aplicar una nueva posición al control de impulso de una nave espacial provocará que ésta acelere (de forma indefinida). Aplicar una nueva posición a los flaps o elevadores de una aeronave producirá (aproximadamente) que su altitud acelere hacia arriba o hacia abajo. Aplicar una nueva posición al volante (una rotación lateral fija) causará que la posición del coche con respecto al centro de una línea recta se acelere (al menos inicialmente). En algunos procesos químicos o de conversión de energía discutidos en el Cap. 16, la aplicación del input (por ejemplo, de un calor añadido) produce una respuesta de 2^o orden en la variable controlada. Por tanto, es importante que los profesionales de los factores humanos entiendan los sistemas de 2^o orden, dadas las cosas que los diseñadores y entrenadores pueden hacer para encauzar sus efectos perjudiciales (errores de tracking y cargas de trabajo mayores) cuando los humanos deben controlarlos.

Recordemos que estos efectos negativos se producen porque los sistemas de 2º orden son inestables y lentos. Su lentitud significa que el sistema no se mueve mucho cuando se controla inicialmente (y el operador puede incluso no tener ningún feedback inicial del movimiento de control; ver Fig. 9.8 e). Los operadores entonces deben anticipar hacia dónde y con qué velocidad está marchando el output del sistema y pueden no hacer esto bien o no hacerlo en absoluto (ver Cap. 8). Por tanto, para el momento en que el output del sistema ha "echado a andar", puede ser demasiado tarde como para "pisar el freno" o revertir el input de control y detenerlo en el objetivo. Así, se producirá una sobre-respuesta y cuando el operador trate de aplicar una corrección, se producirán oscilaciones inestables alrededor del objetivo (ver Fig. 9.8 e). Cuando los sistemas de control de 2º orden provocan este tipo de respuestas en la aviación, se les llama a veces "oscilaciones inducidas por el piloto" (P.I.O.), que se producen porque el piloto no tiene un modelo mental bien formado de la dinámica del sistema, o no puede utilizar ese modelo mental suficientemente rápido como para juzgar y corregir la trayectoria anticipada del vehículo.

Hay tres formas de solución a los problemas creados por los sistemas de 2º orden, o por aquellos que implican cualquier sistema que contiene demoras o retrasos elevados. Una solución, que puede recordarse del Cap. 8, es la implementación de displays predictivos, cuyo valor en numerosas tareas de control de vehículos lentos (submarinos, barcos, o aviones pesados) ha sido bien demostrada, así como en tareas que implican el control de sistemas termodinámicos lentos (por ejemplo, plantas de energía nuclear y de control de procesos; ver Cap. 16).

Por supuesto, para ser útiles, los displays predictivos de dónde estará el sistema dentro de X segundos deben estar acompañados de una previsión (preview) de dónde debería estar dicho sistema dentro de X segundos. Esto equivale al "preview" del input de comando. El "preview" es lo mismo que la visibilidad de la carretera que se extiende frente al conductor en un día claro, en contraste con la falta de visibilidad en un día de niebla densa ("preview" ausente). Se muestra un display de avión, tanto con predicción como con "preview" en la Figura 9.9 (Haskell y Wickens, 1995).

Una segunda solución consiste en enseñar al operador estrategias de anticipación; en esencia, enseñar dónde (hay que) mirar para predecir el futuro. Una de las mejores pistas sobre dónde estarán las cosas en el futuro consiste en percibir la información de la tendencia sobre dónde están yendo ahora mismo; esto es, atender al ratio de cambio actual. Por ejemplo, en la conducción, una de las mejores indicaciones de dónde estará el vehículo (que estamos conduciendo), en relación al centro del carril, es mirar hacia dónde se dirige ahora y con qué velocidad se desplaza. Esta última información puede obtenerse mejor mirando a la carretera para ver si la dirección de desplazamiento se corresponde con la dirección de la carretera que mirando esta desviación inmediatamente enfrente del coche. Esto es por lo que los conductores expertos tienden a escudriñar más lejos sobre la carretera que los novatos (Mourant y Rockwell, 1972). Han aprendido que allí es donde necesitan mirar para predecir qué trayectoria tendrá el vehículo más adelante en la carretera.

Una tercera solución al problema de tareas difíciles de más alto orden de control consiste en automatizarlas, y tratar de desarrollar controles computerizados que realicen muchas de las tareas de tracking de orden superior. Esto es lo que está sucediendo en los

aviones más avanzados, tanto comerciales como militares, en los que los diseñadores están tratando de "reducir" el orden de control de la tarea del piloto a (una tarea de) 1er orden (y algunas veces, de una tarea de 3er orden a una de 2º orden). Cubriremos estos aspectos de la automatización en el Cap. 16, focalizándonos en los costes y beneficios de este proceso.

Retrasos de tiempo y demoras en el transporte

(...)

Ganancia

(...)

Estabilidad

(...)

Sistemas de círculo-abierto versus círculo-cerrado

En todos los ejemplos que hemos descrito hemos asumido implícitamente que el operador percibe un error y trata de corregirlo; esto es, el círculo o bucle mostrado en la Figura 9.6 es "cerrado". Supongamos, en cambio que el operador no tratara de corregir el error sino que ya "sabía" dónde debía estar el sistema y respondiera solamente con el grado de corrección justo al instrumento de control para producirla. Dado que entonces el operador no necesita percibir el error y por tanto no estará pendiente del output del sistema, se da una situación parecida a como si el "círculo" de la Figura 9.6 estuviera "roto" (es decir, una figura de "círculo abierto"). En el comportamiento de círculo-abierto el operador, pues, no está tratando de corregir los outputs que sólo pueden ser visibles después de que el sistema se demore. Como resultado, el operador no 'maldecirá los inconvenientes' de la inestabilidad de círculo-cerrado. Por supuesto, el comportamiento de círculo-abierto depende del conocimiento del operador acerca de dónde estará el objetivo y de cómo el output del sistema responderá a su input de control, esto es, (al conocimiento de) un modelo mental bien desarrollado de la dinámica del sistema (Cap. 6). Por lo tanto, el comportamiento de círculo-abierto es típico sólo de quienes tienen una alta habilidad en su dominio.

El tracking de círculo abierto podría caracterizar al operador de (por ejemplo) un sistema de control de procesos (Cap. 16) que sabe exactamente cuánto calor debe aplicarse a un proceso para alcanzar una nueva temperatura, accionar el instrumento de control de forma precisa en esa cantidad y marcharse. También puede describir (la ejecución de) el hábil bateador de béisbol que sólo necesita echar un corto vistazo a la rápida trayectoria inicial de la bola para saber exactamente cómo balancear el bate de forma que conecte con ella (en este caso no hay tiempo para que funcione el feedback de círculo-cerrado de manera que guíe la respuesta), y también caracteriza al usuario de ordenador experimentado que no necesita esperar a leer en la pantalla para apretar cada tecla en una compleja secuencia de comandos.

Por supuesto, tales usuarios reciben feedback después de que se ha realizado la conducta habilidosa, feedback que será útil en el aprendizaje o "ajuste" del modelo mental correspondiente (Cap. 18).